

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Vysokorychlostní frézování austenitické oceli

High Speed Milling of Austenitic Steel

Student: Michal Borkovec
Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

Ostrava 2011

Zadání bakalářské práce

Student:

Michal Borkovec

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Vysokorychlostní frézování austenitické oceli
High Speed Milling of Austenitic Steel

Zásady pro vypracování:

1. Obecná charakteristika daného problému.
2. Problematika obrábění austenitických ocelí.
3. Efektivní využití HSC frézování.
4. Návrh HSC technologie pro vybranou součást.
5. Diskuze experimentů.
6. Technicko-ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [2] ZAJAC, J.; JURKO, J.; ČEP, R. *Top trendy v obrábění, II. část – Nástrojové materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 193 s. ISBN 80-968954-2-7.
- [3] VASILKO, K. *Analytická teória trieskového obrábania*. Prešov : COFIN Prešov, 2007. 338 s. ISBN 978-80-8073-759-7.
- [4] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB – TU Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [5] TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie - část 2. Základy řízení jakosti*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2006. 86 s. ISBN 80-248-1209-6.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011




doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě18.5.2011.....

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, же оdevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 18.5.2011


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Michal Borkovec

Adresa trvalého pobytu autora práce: T.G.M. 162, 563 01 Lanškroun

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

BORKOVEC, M. *Vysokorychlostní frézování austenitické oceli: bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011, 41 s. Vedoucí práce: Vrba, V.

Bakalářská práce se zabývá vysokorychlostním frézováním austenitických ocelí. Byla realizována ve firmě J.P.Technology. Řeší výrobu součásti do planetové převodovky z austenitické oceli. Je zde popsána moderní technologie s využitím frézovacích nástrojů ISCAR a obráběcího centra DECKEL MAHO DMC 1035 V v porovnání s původní technologií realizovanou HSS nástroji od firmy HHW. V úvodu je popsána obecná charakteristika a obrábění austenitických ocelí. Další kapitola je věnována HSC frézování a jeho efektivního využití. Závěrem práce je zjištění, že při použití nové technologie obrábění austenitických ocelí dosáhneme kratších výrobních časů a tedy i nižších výrobních nákladů.

ANNOTATION OF THE BACHELOR THESIS

BORKOVEC, M. *High Speed Milling of Austenitic Steel: Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2011, 41 p. Thesis head: Vrba, V.

This bachelor thesis deals with high speed milling of austenitic steels. It was implemented in the firm of J. P. Technology. It is concerned with production of components for the planetary gear of austenitic steel. There is described the use of modern technology with a milling tools ISCAR and machining center DECKEL MAHO DMC 1035 V as compared to the original technology implemented by HSS tools from the concern HHW. The introduction describes general characteristics and machining austenitic steels. Another chapter is devoted to the HSC milling and its effective utilisation. In the conclusion, there is the finding that using a new technology machining of austenitic steels achieve the shorter production times and therefore lower production costs.

Obsah

0. Úvod	8
1. Obecná charakteristika daného problému	9
1.1 Popis podniku	9
2. Problematika obrábění austenitických ocelí	11
2.1 Všeobecná charakteristika austenitických ocelí	11
2.1.1 Složení austenitických ocelí	12
2.1.2 Chromniklové korozivzdorné oceli	14
2.1.3 Chromniklové austenitické oceli s přísadou molybdenu	15
2.1.4 Chromniklové austenitické oceli s přísadou molybdenu a mědi	16
2.2 Obrobitelnost austenitických ocelí	16
2.2.1 Obrobitelnost z hlediska fyzikálních vlivů	17
2.2.2 Obrobitelnost z hlediska chemického složení	19
2.2.3 Obrobitelnost z hlediska mikrostruktury	20
2.2.4 Obrobitelnost z hlediska způsobu výroby a tepelného zpracování	21
2.2.5 Požadavky na stroj a nástroj	22
3. Efektivní využití HSC frézování	23
3.1 Pojem HSC a jeho definice	23
3.2 Řezný proces při HSC	24
3.3 Energetická bilance řezného procesu	25
3.4 Energetická bilance řezného procesu	26
3.5 Výhody a nevýhody HSC	28
4. Návrh HSC technologie pro vybranou součást	29
4.1 Součást do planetové převodovky	29
4.2 Vysokorychlostní obráběcí centrum	30
4.3 Rotační nástroje ISCAR	31
5. Diskuse experimentu	33
5.1 Moderní obrábění austenitických ocelí	33
5.2 Původní technologie	35
6. Technicko – ekonomické zhodnocení	37
7. Závěr	38
8. Seznam použité literatury	39
9. Seznam příloh	40

Seznam použitých zkratk a symbolů

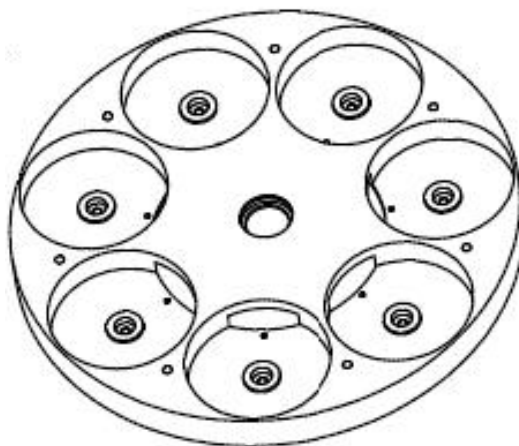
Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
AISI		American Iron and Steel Institute - Americký institut železa a oceli
ap	mm	hloubka řezu
bcc		body-centered cubic – prostorově centrovaná kubická mřížka
CAD/CAM		Computer Aided Design/Komputer Aided Manufacturing- počítačová podpora konstruktéra/díleňské činnosti
CNC		computer numeric kontrol/počítačově řízené stroje
ČSN		Česká státní norma
D	mm	průměr obrobku
d	mm	průměr frézy
DIN		Deutsches Institut für Normung – Německý ústav pro průmyslovou normalizaci
F	N	řezná síla
fcc		face-centered cubic – plošně centrovaná kubická mřížka
fz	mm	posuv na zub
HB		tvrdost podle Brinella
HPC		high performance cutting - vysokovýkonné obrábění
HSC		high speed cutting - vysokorychlostní obrábění
i		součinitel přeměny mech.výkonu na teplo
NC		numeric control - číslicově řízené stroje
n	min ⁻¹	otáčky vřetena
P	W	mechanický výkon
PPD		primární plastická deformace
Qc	J.min ⁻¹	celkové množství tepla vzniklé při odřezávání třísky
Ra	μm	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného povrchu
Re	MPa	mez kluzu materiálu
Rm	MPa	mez pevnosti materiálu
SPD		sekundární plastická deformace
T	N	třecí síla
tas	min	čas jednotkový strojní
Vc	m.min ⁻¹	řezná rychlost
Vf	mm.min ⁻¹	rychlost posuvu
v1'	m.min ⁻¹	rychlost odcházející třísky
z		počet zubů

Úvod

Austenitické oceli patří k těžkoobrobitelným materiálům, které jsou pro svoji vynikající odolnost proti korozi často používaným korozivzdorným materiálem, převážně v potravinářském, chemickém průmyslu nebo tam, kde je zapotřebí nemagnetického materiálu. Moderní CNC obrábění korozivzdorných ocelí je především zaměřeno na dosažení vysoké kvality struktury povrchu, rozměrové přesnosti obrobku, integrity povrchu a vysoké rychlosti výroby při nejnižším možném opotřebení nástrojů. Velký důraz je kladen na snižování výrobních nákladů, automatizaci výroby, za účelem zvýšení efektivnosti výroby a zkrácení doby obrábění.

1. Obecná charakteristika daného problému

Bakalářská práce je zhotovena ve firmě J.P. Technology. V této firmě se zabývají kusovou výrobou součástí z korozi-vzdorných ocelí a slitin hliníku. Hlavním úkolem je porovnání dvou technologií výroby součástí do planetové převodovky z austenitické oceli z hlediska výrobních časů a s tím souvisejících výrobních nákladů.



Obr.1: Ná-kres součásti do planetové převodovky povlakovacího stroje

1.1 Popis podniku a výroba

Firma J.P. Technology sídlí v Postřelmově na ulici Závořická č.p. 546. Jejími majiteli jsou Ing. Josef Příbyl a Jaroslav Peškar. J.P. Technology se zabývá kusovou a malosériovou výrobou do 100 kusů, obrábí převážně hliníkové slitiny a nerez oceli dle výkresové dokumentace s využitím Cad/CAM systémů. Nabízí výrobu strojních dílů



a součástí převážně nerotačního charakteru, frézování na moderním frézovacím centru DECKEL MAHO DMC 1035 V a frézování na konvenčních obráběcích strojích např. na frézce TOS FA4V o maximálních rozměrech 1200 x 560 mm. Také poskytuje základní strojírenské a zámečnické operace a výrobu jednoduchých zařízení. Dále realizuje elektroerozivní drátové řezání, broušení, CNC i klasické soustružení a svařování železných a hliníkových slitin, stříhání a ohýbání plechů.

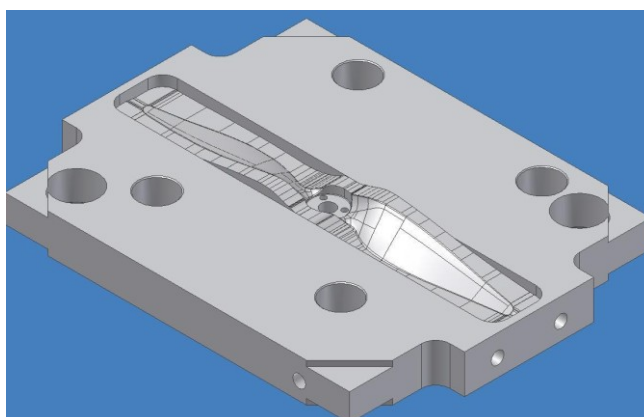
Firma je vybavena moderními frézovacími centry. V roce 2007 zakoupena CNC fréza DMC 1035 V, v roce 2010 CNC fréza DMC 635 V.

Hlavními odběrateli jsou PIVOT Šumperk, EPCOS Šumperk, Verner motor Šumperk, LUGAFO Zábřeh na Moravě, LUX Jablonné nad Orlicí, První hanácká BOW Olomouc a INA Lanškroun.

Ukázka výroby :



Obr.2: Spodní deska formy na výfuk



Obr.3: Vstříkovací forma vrtule



Obr.4: Laminovací forma pro výrobu karbonového pádla

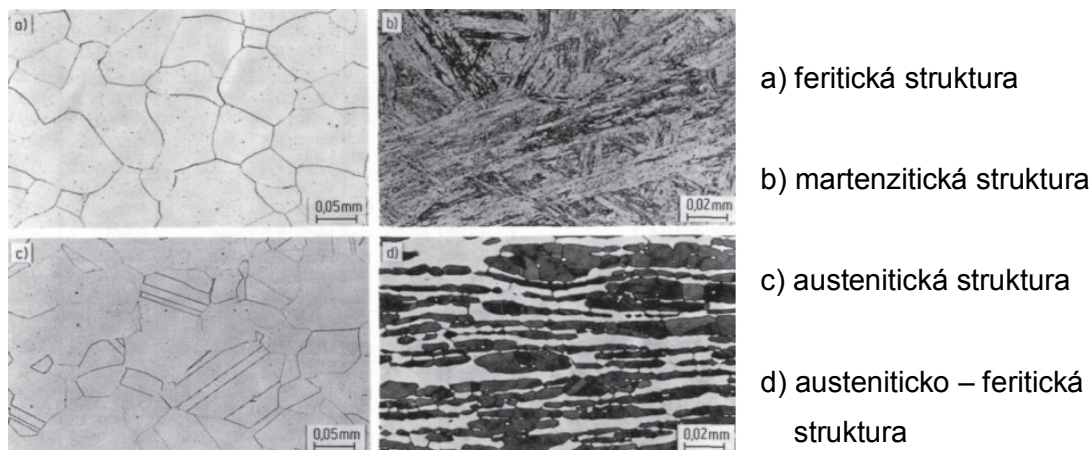
2. Problematika obrábění austenitických ocelí

2.1 Všeobecná charakteristika austenitických ocelí

Strukturu těchto ocelí tvoří převážně tzv. γ -austenit. Austenitická struktura vzniká při dostatečném obsahu tzv. austenitotvorných prvků (Ni, Mn, N). Základním typem je chrom-niklová austenitická ocel s 18% Cr a 9% Ni. Pro docílení požadované korozní odolnosti a mechanických vlastností se přisazují další legující prvky. Pro zachování austenitické struktury však musí být působení austenitotvorných a feritotvorných prvků vyvážené. Vliv základních a doprovodných prvků na vlastnosti lze schematicky charakterizovat následovně:

- celková korozní odolnost (Cr, Mo, Cu, Si, Ni)
- mechanické vlastnosti (N)
- obrobitelnost (S, Se, P, Pb, Cu)
- odolnost proti bodové a štěrbinové korozi (Mo, Si, N)

Austenitické korozivzdorné oceli nepodléhají fázovým přeměnám a jsou nemagnetické. Pevnost lze zvyšovat pouze legováním (např. přísadou N), nebo u některých typů, které se vyznačují menší stabilitou austenitu, tvářením za studena (pěchování, tažení). Pokud jsou tyto oceli po tepelném zpracování nebo svařování pomalu ochlazovány, dochází v oblasti kritických teplot přibližně v rozmezí 600 až 800 °C k vylučování karbidů po hranicích zrn. To způsobuje vznik mezikrystalové koroze v kyselém prostředí vlivem ochuzení zmíněných oblastí o chrom. Jsou však způsoby, jak tomu zabránit prostřednictvím změny chemického složení (velmi nízké obsahy C, přísady Ti resp. Nb). Výchozím stavem pro použití austenitických ocelí je rozpouštěcí žíhání (žíhání při teplotách nad 1000 °C) s následným rychlým ochlazením na normální teplotu. Austenitické korozivzdorné oceli jsou velmi dobře svařitelné a značně houževnaté i při nízkých teplotách. Existuje mnoho druhů a modifikací.[1]



Obr.5: Struktury korozivzdorných ocelí [1]

Austenitické CrNi oceli s 8% Ni jsou obzvlášť výhodné z hlediska zpracovatelnosti, mechanických vlastností a odolnosti proti korozi. Jsou proto vhodné pro mnoho účelů použití a jsou nejvýznamnější skupinou korozivzdorných ocelí. Nejdůležitější vlastností této skupiny ocelí je vysoká korozní odolnost, která se s narůstajícím obsahem legur zvyšuje. Jejím zvyšování napomáhají zejména chrom a molybden. Jak u feritických, tak i u austenitických ocelí je pro dosažení dobrých technologických vlastností nezbytná jemnozrná struktura. Jako konečné tepelné zpracování se provádí rozpouštěcí žíhání při teplotách mezi 1000 a 1150 °C s následným ochlazením ve vodě nebo na vzduchu. Austenitické oceli nejsou na rozdíl od martenzitických ocelí kalitelné. Pro určité oblasti použití se požadují austenitické oceli s vyšší pevností. Zvýšení meze průtažnosti je možné dosahovat například tvářením za studena. V závislosti na stupni přetváření je možné dosahovat různých stupňů zpevnění. Při tvářením za studena může docházet k doplňkové tvorbě deformačního martenzitu. Jinou možností je zpevňování tuhého roztoku opatřeními v oblasti legovací techniky. Největší účinek vykazují prvky uhlík (C) a dusík (N). Avšak přidáváním uhlíku se z korozně-chemických důvodů zříkáme. Dolegovávání dusíkem má v porovnání s uhlíkem tu výhodu, že zároveň se zlepšováním pevnosti se zlepšuje i korozní odolnost. Dusík obsahující austenitické oceli s vyššími hodnotami pevnosti jsou například oceli 1.4311, 1.4318, 1.4406 nebo 1.4439. Důsledným sladěním obsahu legur je možné dosáhnout zvýšení meze 0,2 až na hodnoty převyšující 400 N/mm (1.4565). Hodnoty tažnosti austenitických ocelí jsou téměř dvojnásobné než u feritických ocelí. Vysoké poměrné prodloužení při přetržení vede k velmi dobré tvařitelnosti za studena. Z toho vyplývá příznivá hlubokotažnost a nebo schopnost přetahování, stejně jako dobrá schopnost ohýbání. Zvláštní význam mají také vyšší hodnoty při rázové zkoušce, které jsou vysoké i při velmi nízkých teplotách. Proto mohou být korozivzdorné, za studena tažené oceli používány na zařízení, která pracují při teplotách až -269 °C. [2]

2.1.1 Složení austenitických ocelí

Austenitické korozivzdorné oceli lze rozdělit podle složení na chromniklové a chrommanganové. Oceli na odlitky mají většinou základní složení podobné jako oceli tvářené, jen obsah uhlíku je poněkud vyšší.

Austenitické oceli jsou velmi tvárné a houževnaté, mají velkou tažnost, zúžení a vrubovou houževnatost, a to i při nízkých teplotách. Hodí se proto velmi dobře pro transport a uskladnění tekutých plynů. Vysoká pevnost při poměrně malé mezi kluzu způsobuje, že austenitické oceli tvářením za studena značně zpevňují. Pro využití austenitických ocelí za nízkých teplot je z funkčního hlediska nutné zajištění dostatečné strukturní stability. Korozivzdorné austenitické oceli nacházejí své aplikační využití hlavně v chemickém, potravinářském, farmaceutickém a energetickém průmyslu, používají se pro výrobu kuchyňských potřeb, v dopravě a nově ve velkém množství i v architektuře a stavebnictví.

Výhodou je i úplný sortiment hutního materiálu (plechy, tyčovina, trubky, dráty, výkovky apod.). [6]

Vliv některých legujících prvků na vlastnosti austenitických ocelí:

Chrom – zajišťuje pasivovatelnost ocelí (podmínkou pasivace je obsah chrómu v tuhém roztoku vyšší než 11,5%) a jejich odolnost proti oxidaci. S rostoucím obsahem chrómu se zvyšuje korozní odolnost v oxidačních prostředích.

Nikl – stabilizuje austenit za normální teploty a zvyšuje korozní odolnost v redukčních kyselinách. Vedle chromu je druhým nejdůležitějším prvkem v nerezavějících ocelích. Pro svou vysokou cenu bývá nahrazován manganem.

Mangan – austenitotvorný prvek. Při koncentracích nad 3% snižuje sklon k praskání svarů, zhoršuje obrobitelnost.

Dusík – stejně silně austenitotvorný jako uhlík. Zvyšuje pevnostní hodnoty a spolu s molybdenem zvyšuje odolnost proti bodové a štěrbinové korozi.

Křemík – vyvolává praskavost svarů. V koncentraci 3 až 4 % odstraňuje náchylnost k mezikrystalické korozi a zvyšuje odolnost proti korozi ve vroucí HNO_3 .

Molybden – zvyšuje odolnost proti korozi ve všech prostředích (i vroucích roztoků HNO_3), zvyšuje žárupevnost a podporuje vylučování intermediálních fází. Je to feritotvorný prvek, proto je nutné po jeho přísadě k zachování austenitické struktury zvýšit obsah Ni nebo jiného austenitotvorného prvku.

Měď – slabě austenitotvorný prvek, zvyšuje korozní odolnost v prostředích H_2SO_4 , zlepšuje obrobitelnost. Používá se k legování vytvrditelných ocelí.

Titan a niob – karbidotvorné prvky. Vzhledem k vysoké afinitě k uhlíku tvoří v ocelích Karbidy, a tak snižují obsah uhlíku v matici – stabilizace ocelí. Přidávají se do vytvrditelných ocelí.

Struktura nerezavějících ocelí závisí na kombinaci obsahu feritotvorných (prvky, které zužují oblast γ) a austenitotvorných (prvky, které rozšiřují oblast γ) prvků oceli. [3,4]

Druhy a složení austenitické oceli (AISI)

Typ (AISI)	ČSN	Uhlík	Chrom	Nikl	Mangan	Molybden	Fosfor	Síra	Křemík
č.		C max.	Cr	Ni	Mn max.	Mo	P max.	S max.	Si max.
304	17.240 17.241	0,08	18,00-20,00	8,00-12,00	2,00	--	0,045	0,030	1,00
304 L	17.249	0,03	18,00-20,00	8,00-12,00	2,00	--	0,045	0,030	1,00
316	17.346	0,08	16,00-18,00	10,00-14,00	2,00	2,00-3,00	0,045	0,030	1,00
316 L	17.349	0,03	16,00-18,00	10,00-14,00	2,00	2,00-3,00	0,045	0,030	1,00

2.1.2 Chromniklové austenitické oceli

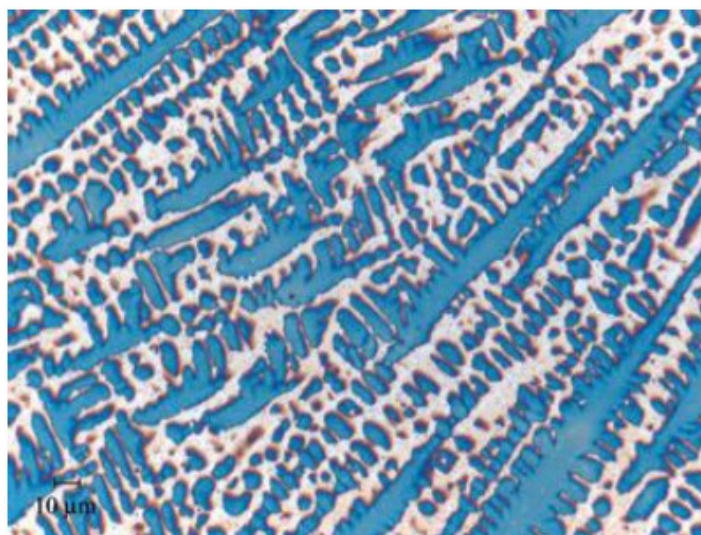
Nestabilizované austenitické oceli

Při postupném zvyšování obsahu niklu v ocelích s obsahem 18% chromu se zužuje oblast feritu delta a rozšiřuje se oblast austenitu. Oblast delta feritu se uzavírá již při 8% niklu a pod křivkou solidu se vyskytuje oblast homogenního austenitu, z kterého se vylučují při pomalém ochlazování karbidy $M_{23}C_6$. Precipitaci je možné potlačit rychlým ochlazením, pokud je obsah uhlíku nižší než 0,15%. Při vyšším obsahu uhlíku se vylučování nezabrání ani ochlazením do vody. Ocel s měkkou, houževnatou a nemagnetickou austenitickou maticí po tepelném zpracování je možné získat vhodnou kombinací chromu, niklu a uhlíku. Při pomalém ochlazování těchto ocelí se po odlití nebo tváření vylučují na hranicích zrn karbidy chromu. Kvůli rozdílným difúzním rychlostem uhlíku a chromu může klesnout místně obsah chromu pod 12% a ocel tak ztrácí schopnost pasivace a podléhá mezikrystalové korozi. Aby se odolnost proti korozi obnovila, je třeba opakovat tepelné zpracování. Pokud ocel po výdrži na teplotě rozpouštěcího žíhání rychle ochladíme, při následujícím ochlazování se zpětná precipitace karbidů potlačí. Ochlazovací rychlost se musí dodržet zejména v intervalu teplot 900 až 600°C, kdy je krátká inkubační doba. Optimální teplota rozpouštěcího žíhání závisí na obsahu uhlíku. V praxi se používá 1100 až 1150°C; vyšší teploty nejsou vhodné, protože hrubne zrna a klesá vrubová houževnatost. Nestabilizované chromniklové austenitické oceli, např. X12CrNi18-8 (ČSN 17 241), mají relativně nízkou mez kluzu a pevnost. Jejich plastické vlastnosti jsou však mimořádně vysoké. Nízká mez kluzu je výhodná u ocelí určených k hlubokému tahu. Tyto oceli mají vysokou odolnost proti korozi, odolávají však špatně korozi pod napětím a za působení chloridů, které místně rozpouštějí pasivační vrstvu. Odolnost proti organickým kyselinám a kyselině sírové se zvyšuje se stoupajícím obsahem niklu. [5]

Stabilizované austenitické oceli

Pro zabránění vylučování karbidů $M_{23}C_6$ se tyto oceli legují titanem nebo niobem, které tvoří s uhlíkem stabilnější karbidy TiC a NbC. Maximální obsah titanu bývá 0,80%, jinak by se při vyšším obsahu příliš zvyšoval obsah delta feritu. Minimální obsah titanu se určuje podle obsahu uhlíku. Ke stabilizaci elektrod určených ke svařování se používá obvykle niob, protože má menší propal než titan. Legováním těchto stabilizovaných ocelí titanem byla snaha, jak úplně zabránit mezikrystalové korozi. Ukázalo se však, že i ve stabilizovaných ocelích se objevuje zvláštní druh koroze nazývaný koroze nožová. Tento jev souvisí s rozpouštěním karbonitridů Ti(C,N) při vysoké teplotě a s jejich zpětným vylučováním při ochlazování. V matici stabilizovaných ocelí se nachází vždy delta ferit, který má charakteristický tvar. Jeho obsah závisí na množství feritotvorných a

austenitotvorných prvků, na ochlazovací rychlosti po odlití, na tepelném zpracování a na technologii tváření. Stabilizované oceli, např. X10CrNiTi18-10 (ČSN 17 246), se tepelně zpracovávají buď rozpouštěcím žháním nebo stabilizačním žháním. Teploty rozpouštěcího žhání u stabilizovaných ocelí nemají být vyšší než 1100°C, protože se při vyšších teplotách již začínají rozpouštět karbidy TiC a NbC. Stabilizační žhání se provádí na teplotách, při kterých se uhlík váže maximálně na titan nebo niob jako TiC nebo NbC, tj. v pásmu teplot 850 až 870°C. Po rozpouštěcím žhání se oceli ochlazují ve vodě. Dvojí tepelné zpracování se používá pro získání maximální odolnosti proti mezikrystalové korozi. Nejprve se provede rozpouštěcí žhání na teplotě 1050 až 1100°C a ochlazení do vody. Poté následuje stabilizační žhání na teplotě 870°C po dobu dvou hodin, kdy se uhlík váže maximálně jako globulární karbid TiC nebo NbC. [5]



Obr.6: Mikrostruktura austenitické oceli [2]

2.1.3 Chromniklové austenitické oceli s přísadou molybdenu

Molybden obsažený v chromniklových ocelích se hromadí v ochranné povrchové vrstvičce a tím zvyšuje odolnost ocelí proti korozi v aktivním i pasivním stavu, např. X2CrNiMo17-3-2 (ČSN 17 349). Část molybdenu je rozpuštěna v matrici, část tvoří karbid $(Fe,Cr,Mo)_23C_6$, ve kterém se může rozpustit 3,5 až 10% Mo. Protože je molybden feritotvorný prvek, musí mít tyto oceli vyšší obsah niklu, aby se netvořil delta ferit. Při zvýšeném obsahu molybdenu i niklu se oceli používají na výrobu kondenzátorových trubek chlazených mořskou vodou, kde nahrazují slitiny titanu Monelův kov a mosaz. Oceli s přísadou molybdenu se tepelně zpracovávají rozpouštěcím žháním na teplotě 1100 až 1150°C s následným ochlazením do vody. Po tepelném zpracování zůstávají v matrici nerozpuštěné karbidy, takže oceli mají nižší vrubovou houževnatost. Karbidy však naopak zpomalují růst zrna. Tyto oceli se mohou také stabilizovat titanem. Při obsahu molybdenu nad 2,5% se používají na zařízení na výrobu celulózy sulfidovým způsobem a

tlakové nádoby pro teploty 400 až 550°C. Jsou také vhodné na součástky pracující v chemickém, gumárenském a textilním průmyslu. [5]

2.1.4 Chromniklové austenitické oceli s přísadou molybdenu a mědi

Protože měď jako elektrochemicky ušlechtilý prvek zvyšuje pasivační schopnost, podporuje tak účinek molybdenu, zejména v neoxidačních kyselinách. Matrici tvoří po rozpouštěcím žíhání austenit, ve kterém jsou vyloučeny komplexní karbidy chromu. Obsah mědi v těchto ocelích bývá 3 %, protože tato hodnota odpovídá maximální rozpustnosti mědi v austenitu, např. X1NiCrMoCu25-20-5. Protože se spotřeba chromniklových austenitických ocelí stále zvyšuje, bylo vyvinuto úsilí nahradit drahý nikl prvkem lacinějším. Výběr legovacích prvků je však omezený, protože oblast gama zcela otevírá kromě niklu pouze mangan, rozšiřují ji dusík a měď. Homogenní oblast fáze gama se v ternárním rovnovážném diagramu Fe-Mn-Cr vyskytuje jen při vysokém obsahu manganu a při tak nízkém obsahu chromu, že již není zaručena odolnost proti korozi. Oceli s vyšším obsahem chromu jsou nevhodné, protože se v matrici objevuje křehká fáze sigma. Kombinací železa, manganu a chromu nelze proto získat ocel, která by měla čistě austenitickou strukturu a byla dostatečně odolná proti korozi. Aby se oblast gama posunula k nižšímu obsahu manganu a k vyššímu obsahu chromu, je nutno přidat další austenitotvorný prvek dusík.[5]

2.2 Obrobitelnost austenitických ocelí

Při obrábění korozivzdorných ocelí platí za těžkoobrobitelné především austenitické oceli. Obrobitelnost těchto ocelí je nepříznivě ovlivňována jejich velkým sklonem ke zpevňování za studena, nízkou tepelnou vodivostí a dobrou houževnatostí. Nejdůležitějším prvkem, který přispívá ke zlepšení obrobitelnosti korozivzdorných ocelí, je síra. Korozivzdorné oceli určené k třískovému obrábění je možné rozdělit do dvou skupin. Pro speciální použití jsou vedle toho k dispozici také speciální automatové oceli. Automatové oceli obsahují zpravidla 0,15 až 0,35% S. Síra tvoří ve spojení s manganem sulfid manganu, jehož pozitivní účinek na obrobitelnost spočívá v lámavosti na drobné třísky, v hladkém povrchu obrobku a v menším opotřebení nástrojů. U automatových ocelí je nutné si povšimnout určité újmy na odolnosti proti korozi. Oceli druhé skupiny obsahují přísady síry v množství 0,015 až 0,030% a tyto obsahy jsou ještě pod mezní hodnotou normy. Nastavením definované velikosti, počtem a rozložením sulfidů v příčném průřezu materiálu se v porovnání se standardními oceli s výrazně nižšími obsahy síry dosahuje vyšší řezné rychlosti a o více než 100% delší trvanlivost nástroje. V porovnání s klasickými automatovými oceli jsou ale tyto hodnoty nižší.

Druh oceli		
Zkratka	Materiál	Obsah síry v %
Automatové oceli		
X14CrNoS17 X6CrMoS17 X8CrNiS18-9	1.4104 1.4105 1.4305	0,15 až 0,35
Standardní oceli se zlepšenou obrobitelností ¹⁾		
X5CrNi18-10 X2CrNi19-11 X2CrNi18-9 X6CrNiTi18-10 X5CrNiMo17-12-2 X2CrNiMo17-12-2 X6CrNiMoTi17-12-2	1.4301 1.4306 1.4307 1.4541 1.4401 1.4404 1.4571	0,015 až 0,030
¹⁾ Výběr typických ocelí		

Rozdělení korozivzdorných ocelí na skupiny podle obrobitelnosti

2.2.1 Obrobitelnost z hlediska fyzikálních vlivů

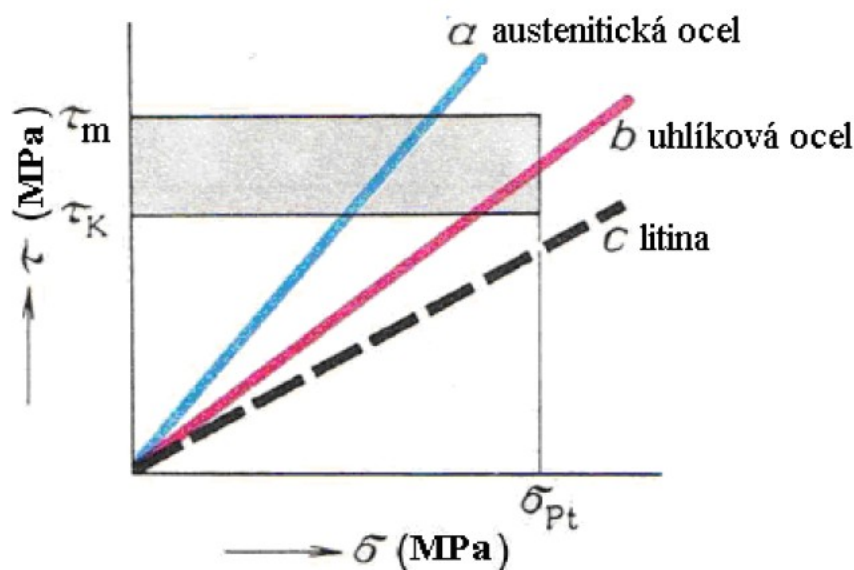
Všechny austenitické oceli jsou nesnadno obrobitelné. Příčinou špatné obrobitelnosti je jejich vysoká pevnost, nízká mez kluzu, vysoká tvárnost, značná houževnatost.

Porovnání vlastností při pokojové teplotě		
DIN	1.1191	1.4541
ČSN	12 050	17 248
$R_{p0,2}$ [MP]	min. 325	min. 200
R_m [MP]	630 - 850	500 - 720
mez smyku τ [MP]	460	186*
HB nekaleno	max 207	160
Tažnost [%]	17	40
Nárazová práce [J]	25	60
Tepelná vodivost [W/m.K]	47	15

- pevnost austenitické oceli není v porovnání s dobře obrobitelnou uhlíkovou ocelí DIN 1.1191 výrazně odlišná
- smluvní mez kluzu je u austenitické oceli přibližně 60 % oproti uhlíkové oceli
- tažnost austenitické oceli je přibližně 2,3 x větší oproti uhlíkové oceli

- mez pevnosti ve smyku je u austenitické oceli přibližně 40 % oproti uhlíkové oceli
- hodnota nárazové práce austenitické oceli je 2,4 x větší než pro uhlíkovou ocel
- tepelná vodivost austenitické oceli je jen přibližně 30 % oproti uhlíkové oceli

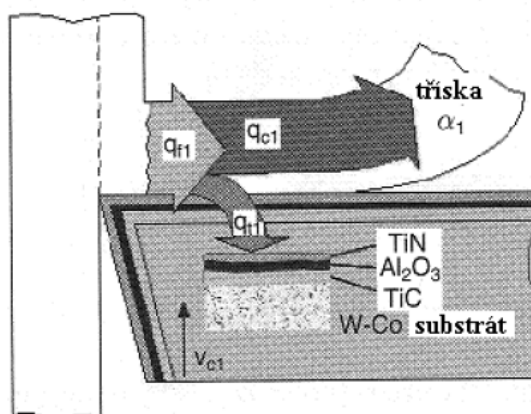
Vysoká tvárnost austenitu je příčinou velkého vývinu tepla a vyšší řezné teploty než při obrábění uhlíkových ocelí při stejných řezných podmínkách. Namáhání materiálu podle přímky *a* (austenitická ocel). Tečné napětí dosáhne v tomto konkrétním případě meze kluzu τ_k a meze pevnosti ve smyku τ_m dříve než normálové napětí meze pevnosti v tahu σ_{pt} . Materiál odřezávané vrstvy se značně plasticky tváří a následně odděluje.[9]



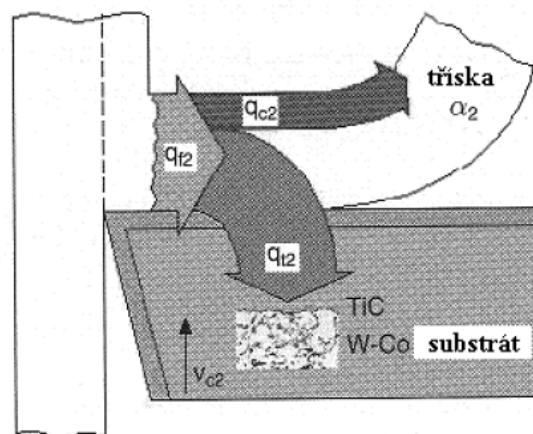
Obr.7: Poměr pevnosti v tahu a ve smyku při obrábění různých materiálů

Při obrábění uhlíkové oceli je největší část vzniklého tepla odváděna třískami. Austenitická ocel se svojí malou tepelnou vodivostí a malou schopností pohlcovat teplo způsobuje vyšší teplotu na břitě.

(a) ČSN 12 050



(b) DIN W nr 1.4000



Obr.8: Tepelná distribuce a) uhlíková ocel, b) austenitická ocel [9]

Vlivem těchto vlastností mají tyto oceli sklon ke zpevňování. Zpevňuje se značně jak odřezávaná vrstva materiálu, tak i povrchová vrstva obrobené plochy, popř. plochy řezu. Při úběru materiálu malých tloušťek může tloušťka zpevněného materiálu přesáhnout tloušťku odebírané vrstvy. [9]

2.2.2 Obrobitelnost z hlediska chemického složení

- množství uhlíku pod 0,15 % zhoršuje velmi obrobitelnost austenitické oceli
- velké množství manganu v materiálu austenitické oceli zhoršuje obrobitelnost
- více fosforu zlepšuje obrobitelnost
- malé množství síry v materiálu austenitické oceli zhoršuje obrobitelnost
- chrom má negativní vliv na obrobitelnost, může vytvořit tvrdé karbidy a tím zvýšit abrazivní opotřebení nástroje
- nikl má negativní vliv na obrobitelnost
- titanem stabilizované druhy austenitických ocelí se v podstatě obrábějí obtížněji, protože titan vytváří TiC a TiN, což zvyšuje abrazivní účinky.

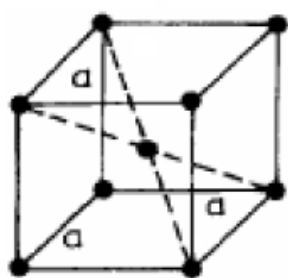
Obecně platí, čím větší procento legur, tím horší obrobitelnost. V materiálech z austenitických ocelí je až 35 % jiných prvků než železa. Vzhledem k odolnosti proti korozi má austenitická ocel převahu nad všemi ostatními druhy ocelí. Často jsou to oceli s dodatečným přidáním síry, někdy s přísadou selenu. Je například jednoduché vylepšovat vlastnosti ocelí, pokud se vztahují k obrobitelnosti, např. přidáváním síry. Tato praxe se realizuje u některých ocelí, určených pro obrábění na automatech, které musí mít dobré vlastnosti pro obrábění, ale u kterých stačí jen minimální odolnost proti korozi. Omezení vztahující se ke zlepšení obrobitelnosti vycházejí z materiálových norem. Odolnost nerezavějících ocelí proti korozi je závislá v první řadě na chemickém složení. [9]

Vzorek	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti	Ca	Al _{celk}	Krouticí moment M_k (N.m)
1	0,099	1,47	0,61	0,017	0,015	18,26	9,91	0,11	0,26	0,007	0,024	5,12
2	0,081	1,44	0,54	0,016	0,184	18,02	9,84	0,08	0,51	0,004	0,032	3,24
3	0,073	1,36	0,50	0,016	0,183	17,27	9,78	2,96	0,37	0,004	0,022	3,18
4	0,076	1,36	0,86	0,015	0,166	16,92	9,71	2,93	0,31	0,014	0,060	3,00

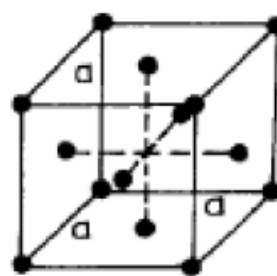
Složení vzorků a naměřený krouticí moment při vrtání konstantní posuvovou silou, vzorek č. 1 je nemodifikovaného složení

2.2.3 Obrobitelnost z hlediska mikrostruktury

Při velkém měrném zatížení, tj. vysoké teplotě řezání a velkém měrném tlaku, se přeměňuje austenit na martenzit a tvoří se tvrdé karbidy. Zpevnění za studena souvisí z velké části s přeměnou austenitické struktury na strukturu martenzitickou v případě, že je materiál vystaven působení vysokých deformačních rychlostí. Austenit jako takový je vázán na vysokou rychlost zpevňování za studena. Efekt zpevňování za studena může být tak výrazný, že na obráběné ploše obrobku vzniknou zóny s extrémně vysokou tvrdostí. Typ krystalové mřížky ovlivňuje i vlastnosti kovových materiálů.



Obr.9a: Prostorově centrovaná
kubická mřížka (bcc)



Obr.9b: Plošně centrovaná
kubická mřížka (fcc)

- kovy s mřížkou fcc (Fe γ , Ni, Al, Ag, Pb, Au aj.) se např. vyznačují dobrou tvárností za tepla i za studena.
- kovy s mřížkou bcc (mezi něž patří i Fe α) mají tvařitelnost i houževnatost horší.

Dobrá tvárnost a vysoká houževnatost austenitu jsou nevýhodné vlastnosti z hlediska obrobitelnosti. Vliv na obrobitelnost mají také vměstky v základním materiálu. Makrovměstky jsou charakteristické pro méně hodnotné oceli. Proto se u austenitických ocelí nevyskytují. Mikrovměstky jsou v určitém rozsahu obsazeny v každé oceli. Jejich vliv na obrobitelnost je možné rozdělit na nežádoucí vměstky, což jsou oxidy hliníku Al₂O₃ a karbidy titanu TiC. Tyto vměstky jsou tvrdé a abrazivní. V případě titanem stabilizované austenitické oceli, která obsahuje 0,4 – 0,7 % Ti, snižuje TiC její obrobitelnost. Dále pak na méně žádoucí, ale tolerované vměstky oxidů železa FeO a manganu MnO. Jejich tvárnost je vyšší.[9]

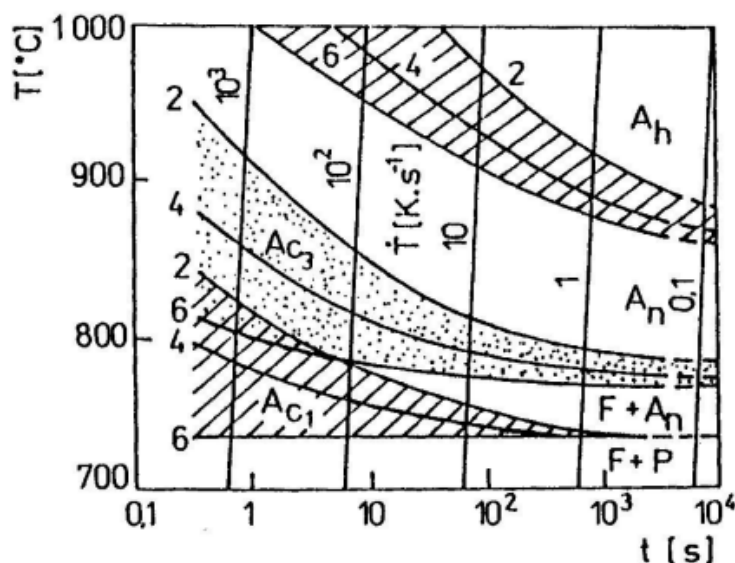
2.2.4 Obrobitelnost z hlediska způsobu výroby a tepelného zpracování

Na obrobitelnost těchto ocelí má také vliv způsob zpracování. Má-li např. tažená tyč austenitické oceli index obrobitelnosti 1, u výkovku je 0,8 a u odlitku 0,6.

Obrobitelnost jednotlivých druhů austenitických ocelí je možno zlepšit austenitizačním žíháním při teplotě 1000 až 1100 °C a ochlazením vodou. Rozpustí se tím tvrdé karbidy a dosáhne se stejnoměrné austenitizační struktury. Dalšího zlepšení obrobitelnosti některých těchto ocelí se dosáhne popuštěním na teplotu 600 až 900 °C, čímž vzniká sorbitická struktura, lépe obrobitelná. Po zpracování se obrobek uveden do původního strukturálního stavu opětovým austenitizačním žíháním a ochlazením ve vodě.

Obyčejně se oceli dodávají ve stavu žíhaném naměkko a tažené za studena. Žíhání naměkko – žíhání bez překrytalizace, které se provádí u ocelí ke snížení tvrdosti a zlepšení obrobitelnosti. Po žíhání naměkko jsou austenitické oceli rychle ochlazeny, aby se tak zajistila jejich odolnost proti korozi a aby se zachovala obrobitelnost. Při příliš pomalém ochlazení se vytváří na hranicích zrna tvrdé a abrazivní karbidy. Z hlediska obrábění je stav oceli žíhané na měkko a tažené zastudena obvykle výhodný, zvláště pro měkké austenitické a feritické oceli. Trvanlivost břitu tím sice trpí, na druhé straně se však zlepšuje kvalita obrobené plochy, menším tvořením otřepů, snižuje se nebezpečí vytváření nárůstku na břitu a odstraňují se problémy při řezání závitů.

Jako výhodné se jeví rovněž zpracovávání austenitické oceli ve stavu po mírném tažení za studena. V mnoha případech použití se u austenitických ocelí objeví problémy s obráběním, vyvolané vytvářením nárůstku, sníženou jakostí obrobené plochy, tvořením otřepů a nepříznivým utvářením třísky. Oceli tažené za studena způsobují se tomto směru jeví jako mnohem výhodnější.[9]



Obr.10: Diagram austenitizace: 2 – globulární perlit, 4 – sorbit, 6 - martenzit

2.2.5 Požadavky na stroj a nástroj

Požadavky na obráběcí stroj při obrábění korozivzdorných ocelí [8]

- použití obráběcích strojů stabilní konstrukce
- vysoká tuhost stroje a spolehlivost chodu vřetene
- při soustružení tyčového materiálu je nutné zajistit dostatečnou podpěru
- při soustružení použít odpovídající chladicí kapalinu
- kapalina by měla být přiváděna do místa obrábění v dostatečném množství, aby se usnadnil odvod tepla ze zóny obrábění
- řezná kapalina by se při frézování měla použít jen tehdy, obrábí-li se nízkými řeznými rychlostmi a při frézování tvarových ploch

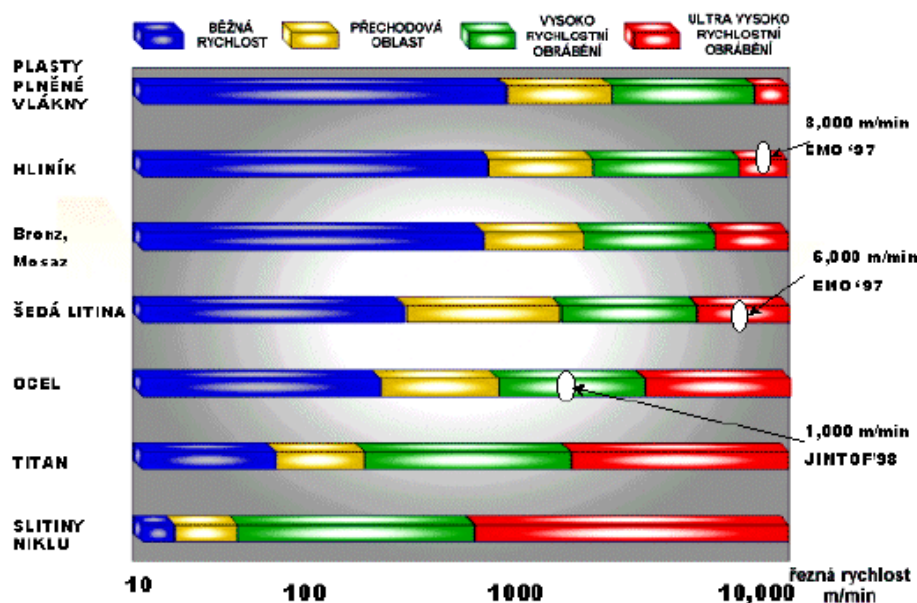
Požadavky na nástroj při obrábění korozivzdorných ocelí

- použít nástroje s co nejmenším vyložením
- nástroje musí být co nejstabilněji upnuty
- přednostně by měly být používány modulární nástroje s vysokou tuhostí
- nutno zvolit vhodný poloměr špičky pro dané použití (nadměrně velký poloměr špičky zvyšuje nebezpečí vibrací)
- použít dostatečně velký pozitivní úhel čela a velký úhel hřbetu
- pro hrubovací operace by měly být břity opatřeny nejmenší možnou fazetkou
- důležité je zvolit takovou geometrii břitu, která umožní udržet kontaktní tření mezi třískou a čelem na co nejnižší možné míře
- při hrubování použít větší hloubky řezu a posuvy společné s redukovanou řeznou rychlostí, menší hloubky řezu a posuvy při vysokých řezných rychlostech jsou spíše nevýhodné
- doporučuje se sousledné frézování. Nesousledné znamená příliš dlouhou dobu kontaktu s vrstvou, ve které dochází k deformačnímu vytvrzování
- dobrou alternativou pro soustružení a frézování je cermet
- při strojním obrábění výrobků z korozivzdorných ocelí je nutné používat nástroje z rychlořezných nástrojových materiálů nebo ze slinutých karbidů

3. Efektivní využití HSC frézování

3.1 Pojem HSC a jeho definice

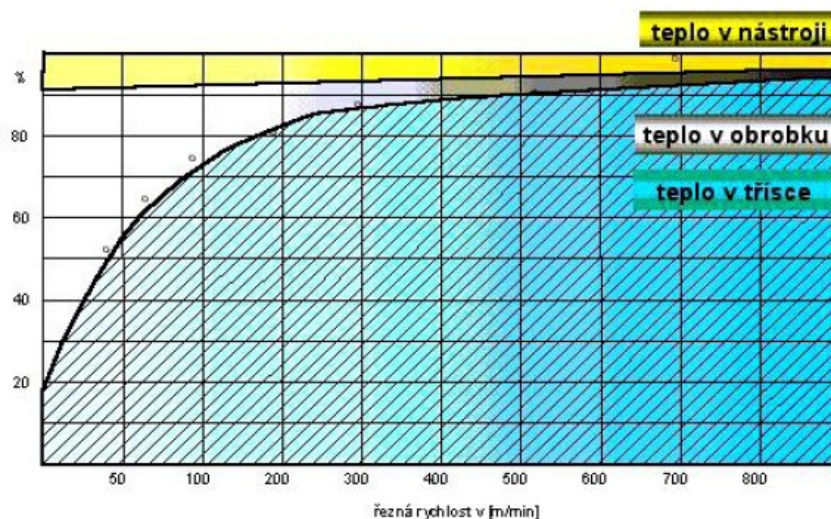
HSC technologie zahrnuje kromě vlastního vysokorychlostního obrábění i tzv. suché a tvrdé obrábění. Suché obrábění sleduje vyloučení nebo minimalizaci užití procesních kapalin a redukci nákladů na jejich filtraci a recyklování. Tvrdé obrábění znamená obrábění kalených ocelí a jiných velmi tvrdých materiálů nástroji s definovanou geometrií břitu náhradou za dříve užívanou technologii broušení. Nejedná se pouze o zmíněnou extrémně vysokou řeznou rychlost, ale také o vysoké rychlosti posuvů. Jde o vysoce výkonné obrábění, při kterém se dosahuje velkých objemů obrobeneho materiálu za časovou jednotku tzv. úběrů. Nelze říci, že konvenční obrábění přechází do oblasti vysokorychlostního obrábění od určité hodnoty řezné rychlosti, bez ohledu na ostatní podmínky vytvářející řezný proces. Těmito podmínkami je myšlen jednak způsob obrábění a především druh obráběného materiálu, který je zejména tím rozhodujícím faktorem určujícím příslušnou velikost řezné rychlosti. Řezné rychlosti, při kterých lze dané materiály obrábět tak, aby byla dosažena přijatelná trvanlivost břitu, jsou velmi rozdílné. Řezná rychlost výrazně ovlivňuje to, jestli obráběný materiál bude tvořit plynulou nebo článkovitou třísku. Vysokou řeznou rychlost při obrábění určitého materiálu lze také definovat jako takovou řeznou rychlost, při které se v celé oblasti primární plastické deformace vytváří pouze lokalizované smyky bez intenzivní plastické deformace. V případě velmi těžkoobrobitelných materiálů, jako jsou titan, nikl a jejich slitiny, se někdy dává přednost spíše pojmu výkonové obrábění, než pojmu obrábění vysokými řeznými rychlostmi, to proto, aby se zdůraznily reálné řezné podmínky.[10]



Obr.11: Rozsahy řezných rychlostí pro jednotlivé druhy materiálů [10]

3.2 Řezný proces při HSC

Při zvyšování řezné rychlosti do oblasti vysokorychlostního obrábění dochází k výrazným odlišnostem, než u konvenčního obrábění. V podmínkách HSC se teplota třísky přiblíží tavné teplotě obráběného materiálu a při určité řezné rychlosti dojde k náhlé změně řady metalurgických i mechanických vlastností třísky. Tříska zčervená, i kalená ocelová tříska změkne a sníží svou přitlačnou sílu na čelo bříty. Třecí síla i celkový řezný odpor klesnou, zvětší se úhel smykové roviny, ztenčí se průřez třísky, zvýší se rychlost jejího odchodu z kontaktní zóny, sníží se plocha kontaktní zóny a omezí se sekundární nárůst teploty třísky třením v kontaktní zóně. Tím vším se i při celkově značném nárůstu procesního tepla minimalizuje přenos tepla do obrobku i do bříty, omezí se působení zhoubných difuzních mechanismů i mechanického vymílání čela. Vysoká kvalita řezné hrany HSC břitů a důmyslné povlakování jejich povrchu zvyšuje odolnost čela proti abrazivnímu i difuznímu opotřebením. Povlakování vytváří navíc i tepelně izolační vrstvu, která ještě více snižuje podíl přestupu procesního tepla do bříty. Růst teploty třísky se po dosažení určité řezné rychlosti zpomaluje a teplota dosahuje svého maxima přibližně při 600 °C při obrábění hliníku, 1000 °C pro bronz, 1300 °C pro šedou litinu a 1500 °C pro ocel. Další zvyšování řezné rychlosti již podstatně nezrychluje ani proces opotřebením bříty nástroje. Velmi rychlá změna teploty i mechanických vlastností třísky v rovině smyku nastane i při vysokorychlostním „tvrdém“ obrábění kalené oceli a i zde dojde při červené třísce k prudkému poklesu řezné síly. Vyšší teplota třísky je pozitivním faktorem i „zdrojem efektů vysokorychlostního obrábění. Intenzivní „povodňové“ chlazení bříty (nástroje) řeznou (procesní) kapalinou již není nutné ani žádoucí, neboť by bránilo dosažení vysokorychlostního režimu. Z hlediska zvýšené citlivosti současných řezných materiálů na tepelné šoky není kapalinové chlazení mnohdy ani přípustné. Použití procesních kapalin může být zcela eliminováno při „suchém“ obrábění nebo nahrazeno nepatrným „přimazáním“ hrany a čela bříty pro snížení tření.[10]



Obr. 12: Rozdělení odváděného tepla v závislosti na řezné rychlosti při obrábění oceli [10]

3.3 Energetická bilance řezného procesu

Veškerá mechanická energie vynaložená na oddělení třísky se přemění v teplo. Řezná rychlost má vliv na teplo vyvinuté při vzniku třísky a jeho odvod z místa řezu. Pro oddělení třísky je zapotřebí vynaložit mechanický výkon:

$$P = (F \cdot v_c) / 60 \text{ [W]}$$

Množství mechanické energie pro oddělování třísky za jednotku času roste úměrně součinu řezné síly (F) a řezné rychlosti (v_c). Řezná síla poněkud klesá, ale současně roste řezná rychlost, což má převládající účinek. Z toho vyplývá, že pro realizaci HSC je zapotřebí vyšších výkonů obráběcích strojů.

Celkové množství tepla vzniklého při odřezávání třísky za jednotku času je dáno vztahem:

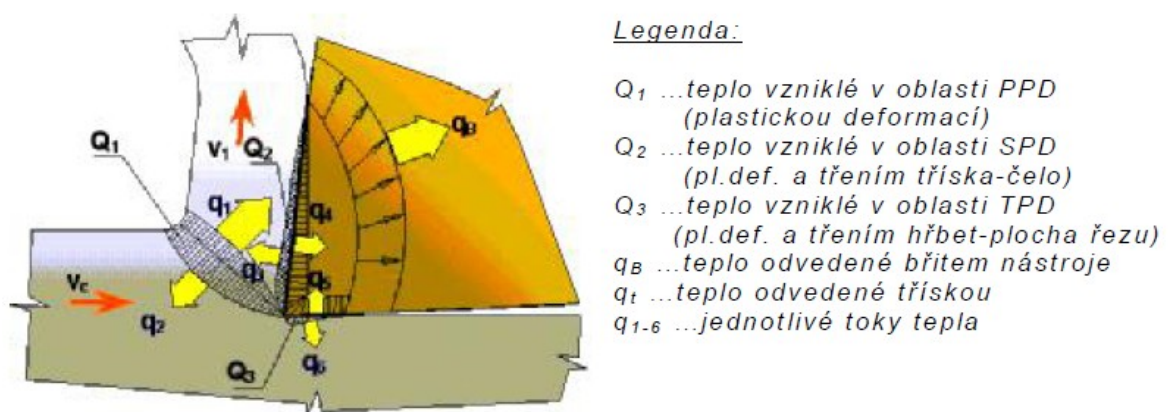
$$Q_c = F \cdot v_c \cdot i \text{ [J / min]}$$

S růstem řezné rychlosti roste i množství tepla vygenerovaného v oblasti PPD a tedy roste i teplota v této oblasti. Počínaje určitou řeznou rychlostí tak dochází ke snížení pevnosti obráběného materiálu, což se projeví snížením řezné síly, a proto se zpomalí nárůst střední teploty řezání.

Množství tepla vzniklého třením v oblasti SPD:

$$Q_{SPD} = T \cdot v_1 \cdot i \text{ [J / min]}$$

Zpomalení především závisí na množství tepla vzniklého v oblasti SPD třením třísky-čelo břitu. Na množství tepla vzniklé v této oblasti působí na jedné straně růst rychlosti odcházející třísky a na druhé pokles třecí síly (zmenšuje se koeficient přechování). Odpevňující účinek se příznivě projevuje i při obrábění zušlechtěných a žáruvzdorných ocelí a speciálních slitin niklu a kobaltu.



Obr.13: Místa vzniku tepla a směry jeho odchodu [10]

3.4 Výhody a nevýhody HSC

VÝHODY

- Důsledkem vysoké hodnoty úběrů (cm^3/min) se získá větší objem odebraného materiálu resp. třísek za jednotku času. Množství odebraného materiálu je zhruba o 30% větší než při konvenčním obrábění.
- Se zvyšujícími se otáčkami vřetene je umožněna vyšší rychlost posuvu při stejné tloušťce odebírané vrstvy jako při konvenčním obrábění. Proto je dosažen významného snížení strojních časů.
- Snížení řezných sil a silových deformací soustavy S-N-O.
- Zvýšení podílu tepla odváděného třískou - vlivem řezné rychlosti dochází ke změně rozložení odvodu tepla (v režimu HSC: 75% třískou, 10% břitem nástroje, 10% okolním prostředím, 5% obrobkem).
- Snížením podílu tepla odváděného obrobkem dochází k eliminaci jeho tepelných deformací.
- Vlivem nárůstu posuvové rychlosti se tepelné ovlivnění obrobku ještě snižuje.
- Zvýšení rozměrové přesnosti obrobku.
- Zlepšení kvality (obecně integrity) obrobeného povrchu, která vede k minimalizaci nebo k úplnému odstranění dokončovacích operací.
- Protože jsou při vysokorychlostním obrábění obecně používány malé hloubky řezu, jsou nástroj a vřeteno zatěžovány jen malými radiálními silami. To šetří ložiska vřetene, vedení a kuličkové šrouby. HSC ve spojení s axiálním frézováním (hloubkovým) je výhodná kombinace, neboť ložiska vřetena jsou tím méně zatěžována a je možno využít delších nástrojů bez rizika vibrací.
- Redukce nástrojového vybavení stroje.
- Omezení nebezpečí vzniku chvění přesunem řezných podmínek mimo rozsah kritických vibrací soustavy S-N-O.
- Produktivita je celkově největší při fázi dokončování, přestože je dosahováno nadstandardní kvality povrchu, často drsnost nižší než $R_a \sim 0,2 \text{ mm}$.
- HSC umožňuje také obrábění velmi tenkých obrobků. Při tomto obrábění je nasazováno sousledné frézování. Čas kontaktu mezi břitem a obrobkem musí být extrémně krátký a je nutno se zároveň vyvarovat vibrací a odchylek. Geometrie frézy musí být pozitivní a ostří velmi ostré (malý radius).

NEVÝHODY

- Nákladné strojní vybavení.
- Speciální (drahé) nástroje a řezné materiály.
- Nutnost vyvažování rotačních nástrojů.

- Speciální přesné upínání řezných nástrojů.
- Speciální upínání obrobků.
- Odstraňování velkého objemu třísek za jednotku času.
- Zvýšení intenzity otupování břitů.
- Nedostatečné odzkoušení technologických dat pro HSC projektování – pro některé druhy materiálů.
- Zvýšené náklady na zajištění dostatečné bezpečnosti obsluhujícího personálu.
- Pro tuto technologii obrábění jsou typické malé rozměry (průměry) nástrojů.
- Hrubování, předdokončení a dokončení lze hospodárně realizovat jen tehdy, když je celkový odebíraný objem relativně malý.
- Velké hodnoty zrychlení a zpomalení při startu a při zastavování vřetene přinášejí rychlejší opotřebení vedení, ložisek a uložení a tím vedou k nárůstu nákladů na opravu a údržbu.
- Nepostradatelné jsou vysoké odborné znalosti této technologie, vyhovující programové vybavení a spojení pro rychlý přenos dat.
- Testovací fáze vykazuje značnou časovou náročnost.
- Nezbytná je také technická příprava výroby včetně plánování výroby s důrazem na optimalizaci tohoto řezného procesu a to vše na vysokém stupni/úrovni propracovanosti (nutno plně/hospodárně využít poměrně drahé výrobní zařízení a nářadí).

Obrábění vysokými řeznými rychlostmi vede ke zvýšení produktivity obrábění i kvality obrobku. Vyšší kvalita obrobku se projeví zlepšením drsnosti obrobeného povrchu, příznivým charakterem ovlivnění zbytkových pnutí v obrobeném povrchu a omezením možnosti vzniku tepelných deformací obrobku. Pro širokou aplikaci této metody, pro obrábění litiny a ocelí, zejména zušlechtěných, je limitním faktorem řezivost, přesněji řečeno mez tepelné stability stávajících řezných materiálů, zejména slinutých karbidů, ale obecně i vlastnosti ostatních řezných materiálů. HSC se stává nejvýhodnějším způsobem obrábění obrobků vysoké rozměrové přesnosti a kvality povrchu. Do dnešní doby tento způsob obrábění nacházel uplatnění pouze při obrábění materiálů menší pevnosti a tvrdosti jako jsou slitiny hliníku či mědi v oblastech leteckého a zbrojního průmyslu, ale požadavky se zvyšují a nastává zde potřeba využít HSC ve všech oblastech obrábění, pro všechny druhy materiálů. Tento trend se objevuje až v posledních letech vlivem technického pokroku.[10]

3.5 Aplikace vysokorychlostního obrábění

Typické aplikace:

První z nich je obrábění s vysokým podílem hrubování při použití výkonných vřetenových jednotek. Příkladem je výroba integrálních dílů pro letecký průmysl, nebo sériová výroba v automobilovém průmyslu a u jeho subdodavatelů. HSC metodami se vyrábějí střední série komponentů: skříně převodovek, díly brzd, pumpy, hlavy válců a pod. Materiálem zde jsou převážně slitiny hliníku.

Druhou typickou aplikací HSC technologií jsou součásti z křehkých materiálů nebo součásti s tenkými stěnami náchylnými na deformace. Ty nelze konvenčními metodami úspěšně opracovat. Při obrábění vysokými rychlostmi vznikají jen malé síly působící na obrobek a tím i malá pravděpodobnost deformace obrobku.

Třetí skupinu tvoří obrábění součástí z materiálů citlivých na teplo vzniklé při řezném procesu. Zde se využívá efektu tepelných toků do materiálu obrobku z procesu řezání.

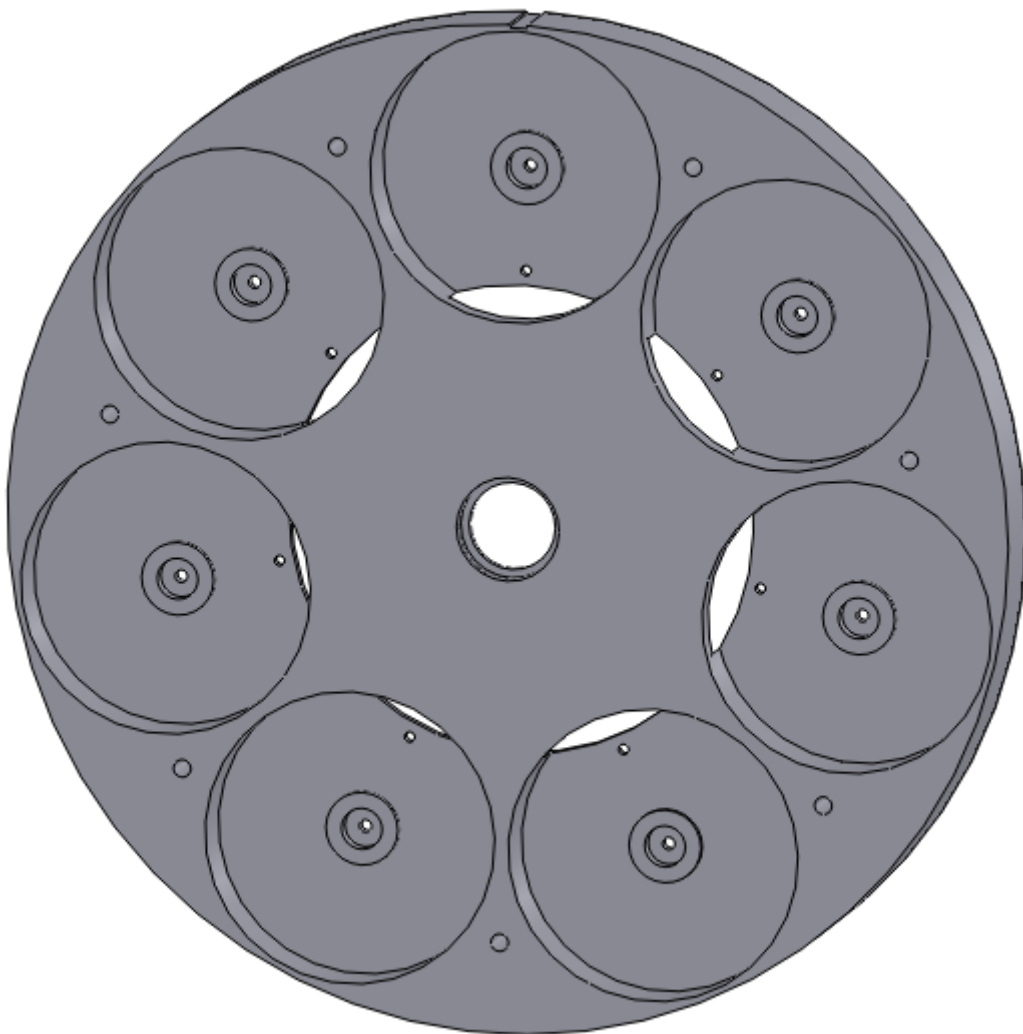
Do čtvrté skupiny můžeme zařadit výrobce zápustek, forem, lisovacích nástrojů a elektrod. Přínosem je kromě zkrácení času výroby také výrazné zkrácení výrobního řetězce, snížení rozpracovanosti výroby, náhrada některých nekonvenčních metod obrábění. Odpadne také nutnost následného ručního dokončování povrchu formy. Typickými materiály jsou ocel, kalená ocel a měď.

Zvýšená přesnost, integrita povrchu a dokonalé odfrézování požadovaného materiálu obrobku má za důsledek redukci či úplné odstranění dokončovací fáze opracování, jako jsou elektrojiskrové obrábění, dobrušování, leštění nebo ruční dokončování. K obrobení celého obrobku bude zapotřebí pouze několika frézovacích nástrojů pro hrubování a při dokončování použití pouze nástroje jedné velikosti, z čehož plyne výrazná úspora nástrojů. Další výhodou je zkrácení průběžných časů obrábění a tím snížení finančních nákladů. Při obrábění materiálů pro zápustky a formy je použití HS obrábění teprve v počátečním stádiu. Příčinou jsou vysoké mechanické vlastnosti obráběného materiálu, které vytvářejí řadu překážek pro jeho uplatnění. Proto nasazení HSC technologií vyžaduje vysoké nároky na vhodnou volbu jak obráběcího stroje a nástrojů, tak i řezných podmínek. Mezi překážky patří především vysoká intenzita opotřebení bříty, způsobená mimo jiné vysokými teplotami řezání. [10]

4. Návrh HSC technologie pro vybranou součást

4.1 Součást do planetové převodovky

Ve firmě J.P. Technology se vyrábějí mimo jiné součásti do planetové převodovky z nerez ocelí, převážně z materiálu 1.4301 (austenitická ocel) a různých typů provedení o rozměrech cca 500 mm v průměru a 40 mm tloušťky. Řešili jsme technologii výroby součásti o rozměrech 487 mm v průměru a 40 mm tloušťky. Vybrali jsme vhodné nástroje z katalogu rotačních nástrojů ISCAR a zvolili doporučené řezné podmínky. Dále jsme určili sled jednotlivých operací a naprogramovali dráhy jednotlivých nástrojů.



Obr.14: Model vyráběné součásti do planetové převodovky

4.2 Vysokorychlostní obráběcí centrum

Pro výrobu dané součásti jsme zvolili vysokorychlostní vertikální obráběcí centrum DECKEL MAHO DMC 1035 V o pracovním rozsahu 1035 mm x 560 mm x 510 mm.

Základní parametry stroje

Posuv

Posuvová síla	N	4.000
Rychlost posuvu	m/min	30
Rychloposuv	m/min	30

Pracovní vřeteno

Rozsah otáček max.	ot/min	14 000
Výkon pohonu (40% / 100% zatíž.)	kW	13 ⁽¹⁾ / 8,4 ⁽¹⁾
Krouticí moment (40% / 100% zatíž.)	Nm	83 ⁽¹⁾ / 57 ⁽¹⁾

Výměník / výměník nástrojů (dvojité chapač)

Počet nástrojů v zásobníku		20
Max. délka nástroje	mm	300
Čas výměny nástroje	s	1,6

Provedení stolu

Manipulační výška (horní hrana stolu)	mm	720
Zatížení stolu	kg	1.000

Řídicí systém

S-B3067

3D-řízení Heidenhain i TNC 530



Obr. 15: Obráběcí centrum DECKEL MAHO DMC 1035 V

4.3 Rotační nástroje ISCAR

Nová skupina fréz firmy ISCAR s obchodním označením FEEDMILL umožňuje vysoce produktivní odběr materiálu při velmi vysokých hodnotách posuvů – až do 3.5 mm/zub. Tyto nové čelní a stopkové frézy využívají speciální pozitivní trigon destičky s velkým rádiusovým břitem umožňujícím klidný chod nástroje i při velmi vysokých posuvech. Výsledné řezné síly jsou směřovány převážně v axiálním směru. To zabezpečuje vyšší stabilitu nástroje při obrábění vysokými posuvy s dlouhým vyložením nástroje. Nové kuželové stopky BT a DIN69871 s dlouhým vyložením jsou konstruovány pro použití nových rychloposuvových nástrojů při obrábění hlubokých dutin. Nové destičky FF WOMT jsou opatřeny válcem na spodní straně, který přesně zapadá do odpovídající díry v lůžku. Tato konstrukce umožňuje destičkám přenášet vysoké řezné tlaky vznikající při velkých posuvech. Zabezpečuje velmi pevné upnutí prostřednictvím válce pohlcujícího většinu sil jinak běžně působící na upínací šroub. Monolitní karbidové frézy ISCAR CHATTER FREE přinášejí zvýšení produktivity a snižování výrobních časů, Unikátní přesně broušená geometrie umožňuje frézy používat i pro dokončovací operace. Nové jakosti karbidů garantují vysoce uspokojivou životnost těchto nástrojů.



Obr.16: Kompletní katalog frézovacích nástrojů ISCAR

Seznam nástrojů:

1. Kopírovací fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami FF FW D40–16–06–C
2. Tvrdokovový vrták, vnitřní chlazení SCD 6 – 060-035 – 060 ACG5
3. Stopková celokarbidová hrubovací čtyřbřitá fréza EFS - B44 16-34C16-92
4. Fréza stopková HSS-PM Ø 20
5. Fréza drážkovací MM GRIT 22K/P – 2.00 – 0.20
6. Fréza stopková E45X D08-W16-06
7. Tvrdokovový vrták, vnitřní chlazení SCD 8,4 – 084 - 049 – 100 ACG5
8. Stopková celokarbidová hrubovací čtyřbřitá fréza EFS - B44 10-22C10-72
9. Tvrdokovový vrták, vnitřní chlazení SCD 5,6 – 056 - 035 – 060 ACG5
10. Závitník tvářecí M6 GHX – HSS PM
11. Tvrdokovová stopková fréza HPC Ø 8



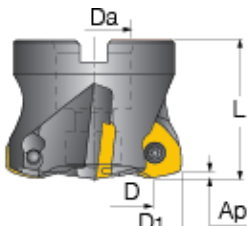
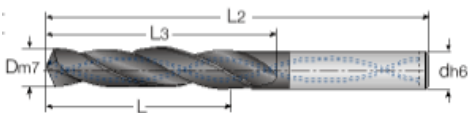
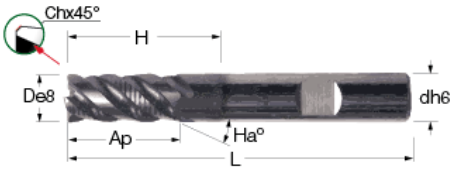
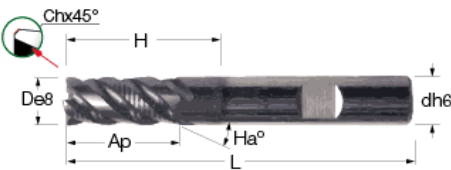
Obr.17: Nástroje použité na obrobení vrchní strany dílu


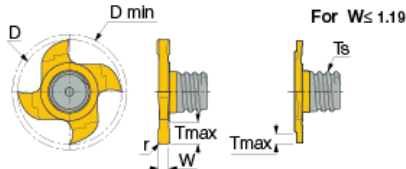
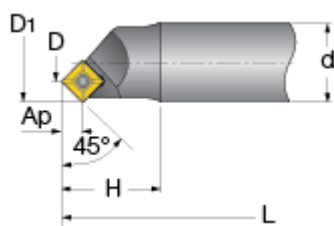
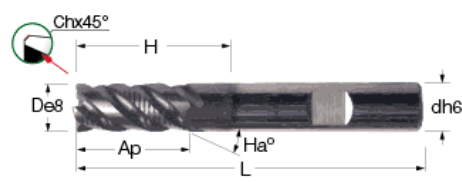
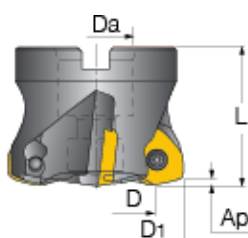
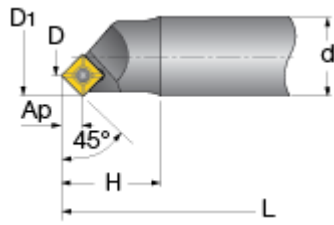
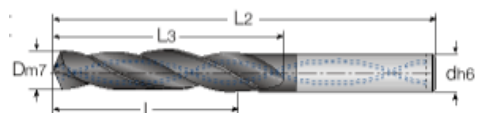
5. Diskuse experimentu

5.1 Moderní obrábění austenitické oceli

Polotovar o průměru 487 mm a síle 40 mm s předsoustruženým konstrukčním otvorem jsme upnuli pomocí upínek na pracovní stůl stroje a následně najeli nulový bod ve středu obrobku dotykovou infra sondou Heidenhain TS 640. Obrábění součásti probíhalo dle vytvořeného NC programu sledem jednotlivých operací technologického postupu.

Sled jednotlivých operací

číslo operace	nástroj	druh operace	řezné parametry	čas (min)
příprava nástrojů, jejich odladění, kontrola programu, upnutí obrobku				45
1	fréza FF FW D40 – 16 – 06 –C destičky trigonový tvar FF WOCT 060212T-M 	hrubování otvorů Ø 141 – 7x destičky otáčeny po obrobení dvou otvorů	Vc = 138 Vf = 4400	140
2	vrták SCD 6 – 060-035 – 060 ACG5 	vrtání děr Ø 6 v ose otvorů – 7x	Vc = 57 Vf = 120	3
3	fréza EFS - B44 16-34C16-92 	hrubování dna otvorů – 7x	Vc = 110 Vf = 380	27
4	fréza EFS - B44 16-34C16-92 	dokončení dna otvorů – 7x	Vc = 110 Vf = 380	6

5	fréza stopková HSS-PM Ø 20 	celkové dokončení otvorů	Vc = 74 Vf = 380	25
6	fréza drážkovací MM GRIT 22K/P – 2.00 – 0.20 	frézování drážky	Vc = 61 Vf = 200	2
7	fréza stopková E45X D08-W16-06 	sražení hran na výstupcích v otvorech – 7x	Vc = 250 Vf = 1000	2
otočení kusu, upnutí a najetí sondou				30
8	fréza EFS - B44 16-34C16-92 	kalibrace Ø 260	Vc = 110 Vf = 380	7
9	fréza FF FW D40 – 16 – 06 – C destičky trigonový tvar FF WOCT 060212T-M 	hrubování konstrukčního otvoru Ø 226	Vc = 138 Vf = 4400	4
10	fréza stopková E45X D08-W16-06 	sražení vnější hrany konstrukčního otvoru	Vc = 250 Vf = 1000	2
11	vrták SCD 8,4 – 084 - 049 – 100 ACG5 	vrtání děr Ø 8,4	Vc = 52 Vf = 150	8

12	fréza EFS - B44 10-22C10-72 	kalibrace konstrukčního otvoru Ø 226 a frézování děr Ø 15	Vc = 110 Vf = 200	8
13	vrták SCD 5,6 - 056 - 035 - 060 ACG5 	vrtání děr pro závit M6	Vc = 40 Vf = 136	6
14	závitník tvářecí M6 GHX - HSS PM 	tváření závitu M6 v předvrtaných dírách 5,6 - 7x		6
otočení, upnutí na sklopný stůl, najetí sondou				30
15	TK stopková fréza HPC Ø 8 	frézování drážky 1,5 mm	Vc = 101 Vf = 470	3
celkový čas				354



Obr.18: Dotyková infra sonda Heidenhain TS 640

5.2 Původní technologie

Na výrobu součásti se dříve používaly monolitní HSS frézy od firmy HHW. Pro tyto nástroje byly stanoveny výrazně nižší hodnoty řezných rychlostí a posuvů, a proto vycházely delší časy jednotlivých operací a tedy i celkový čas výroby součásti.

Sled jednotlivých operací

číslo operace	nástroj	druh operace	čas (min)
příprava nástrojů, jejich odladění, kontrola programu, upnutí obrobku			45
1	fréza stopková hrubovací HR HSS- PM/TiAIN 20 mm	hrubování otvorů Ø 141 – 7x	210
2	vrták spirálový s válcovou stopkou HSS – E Ø 6	vrtání děr Ø 6 v ose otvorů – 7x	12
3	fréza stopková hrubovací HR HSS- PM/TiAIN 16 mm	hrubování dna otvorů – 7x	50
4	fréza stopková dokončovací NF HSSE/TiAIN 16 mm	dokončení dna otvorů – 7x	10
5	fréza stopková dokončovací HR HSS-PM/TiAIN 20	celkové dokončení otvorů	25
6	drážkovací fréza HSS – E	frézování drážky	15
otočení kusu, upnutí			30
7	fréza stopková dokončovací NF HSSE/TiAIN 16 mm	kalibrace Ø 260	10
8	fréza stopková hrubovací HR HSS- PM/TiAIN 20 mm	hrubování konstrukčního otvoru Ø 226	8
9	vrták spirálový s válcovou stopkou HSS – E Ø 8,4	vrtání děr Ø 8,4	28
10	fréza stopková dokončovací NF HSSE/TiAIN 10 mm	kalibrace konstrukčního otvoru Ø 226	11
11	vrták spirálový s válcovou stopkou HSS – E Ø 5,6	vrtání děr pro závit M6	24
12	závitník tvářecí M6 GHX – HSS PM	tváření závitu M6 v předvrtaných dírách 5,6 – 7x	6
otočení kusu, upnutí na sklopný stůl			30
13	fréza stopková dokončovací NF HSSE/TiAIN 8 mm	frézování drážky 1,5 mm	5
14		ruční odjehlení	45
celkový čas			564

6. Technicko – ekonomické zhodnocení

Na výrobu osmi součástí do planetové převodovky je zapotřebí koupit plechovou desku o rozměrech 2000 x 1000 x 45 mm. Cena toho plechu činí 60 000 Kč. Poté následuje vyřezání osmi polotovarů o Ø 492 mm. Cena vyřezání vodním paprskem je 9 600 Kč. Dále se vyřezaná kola soustruží na čisto na Ø 487 mm a tloušťku 40 mm a hrubuje se konstrukční otvor. Celková cena soustružení vychází na 12 800 Kč. Obrábění 1 součásti na CNC stroji při použití moderní technologie trvá 354 min (5h 54min). Sazba CNC stroje za 1 h činí 750 Kč, tedy cena obrábění 1 kusu na CNC stroji je 4 425 Kč. Obrábění 1 součásti na CNC stroji při použití původní technologie trvá 564 min (9h 24 min). Při sazbě 1200 Kč/h na CNC stroji by obrábění jednoho kusu přišlo na 11 280 Kč.

	cena (Kč)	
	1 ks	8 ks
materiál 2000x1000x45	7 500	60 000
řezání na vodním paprsku kolo D=492	1 200	9 600
soustružení na D=487 a sílu 40mm	1 600	12 800
obrábění – moderní technologie cena stroje za hodinu 750 Kč	4 425	35 400
obrábění – původní technologie cena stroje za hodinu 1200 Kč	11 280	90 240
celkem moderní technologie	14 725	117 800
celkem původní technologie	21 580	172 640

Porovnání cen

Z výše uvedených hodnot vyplývá, že cena výroby jedné součásti při použití moderní technologie je o 6 855 Kč nižší v porovnání s cenou při použití původní technologie. Rozdíl cen na zakázku výroby 8 kusů činí 54 840 Kč ve prospěch moderní technologie.

7. Závěr

Cílem této bakalářské práce na téma Vysokorychlostní frézování austenitické oceli bylo porovnání dvou různých technologií výroby součásti do planetové převodovky z hlediska výrobních časů a s tím souvisejících výrobních cen. Firma JP Technology dříve obráběla austenitické oceli HSS nástroji od firmy HHW, nyní používá moderní frézovací nástroje ISCAR a obráběcí centrum DECKEL MAHO DMC 1035 V.

V úvodní části této bakalářské práce jsem se zaměřil na obecnou charakteristiku a na obrábění austenitických ocelí. Další kapitola je věnována HSC frézování a jeho efektivního využívání v současnosti. Definovat vysokorychlostní obrábění v porovnání s konvenčním je velice složité, neboť závisí na hlavní řezné rychlosti, rychlosti posuvu a především na druhu obráběného materiálu, tudíž nelze jednoznačně určit hranici mezi těmito technologiemi. Obrábění austenitických ocelí v porovnání s nelegovanými uhlíkovými ocelmi je problematické kvůli specifickým vlastnostem materiálu jak při konvenčním obrábění, tak i při použití vysokorychlostních technologií.

V další části jsem popsal moderní technologii výroby zvolené součásti a porovnal ji s původní technologií.

Zjistil jsem, že při použití nové technologie obrábění austenitických ocelí dosáhneme kratších výrobních časů a tedy i nižších výrobních nákladů.

8. Seznam použité literatury

- [1] Charakteristika korozivzdorných ocelí. *Charakteristika_korozivzdornych_oceli2.pdf*. [cit.2011-03-15]. Dostupné z WWW: <http://www.ateam.zcu.cz/charakteristika_korozivzdornych_oceli2.pdf>.
- [2] Korozivzdorné oceli - vlastnosti. In *StainlessSteelPropertues_CZ.pdf*. [s.l.] : [s.n.], 2008 [cit.2011-03-18]. Dostupné z WWW: <http://www.euroinox.org/pdf/map/StainlessSteelProperties_CZ.pdf>. ISBN 2-87997-0822.
- [3] ČÍHAL, Vladimír. *Mezikrystalová koroze ocelí a slitin*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1978, 408 s. DT 669.14:620.193.
- [4] PTÁČEK, Luděk a kolektiv. *Nauka o materiálu II*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [5] FREMUNT, P., PODRÁBSKÝ, T. *Konstrukční oceli*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 1996, 267 s. ISBN 80-85867-95-8.
- [6] Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály. *MM Průmyslové spektrum*. 2003, č. 6, s. 76. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcnimaterialy-2-2>>.
- [7] Moderní obrábění nerezových ocelí. *MM Průmyslové spektrum*. 2003, č. 4, s. 40. Dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-obrabeni-nerezovych-oceli>>.
- [8] AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [9] STRNAD, Tomáš. *Obrobitelnost austenitické ocele* [online]. Západočeská univerzita v Plzni : Katedra Technologie Obrábění, 2011 [cit. 2011-05-08]. Dostupné z WWW: <https://portal.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=43007>.
- [10] SKOPEČEK, Tomáš; VODIČKA, Jaroslav; PAHL, Jörg-Peter; HERKNER, Volkmar. *Základy vysokorychlostního obrábění-HSC*. Západočeská univerzita v Plzni : Katedra technologie obrábění, 2005. 136 s. ISBN 80-7043-344-2.
- [11] BRYCHTA, Josef. Problematika vysokorychlostního obrábění 3D ploch na přelomu tisíciletí. *Sborník Vědeckých prací Vysoké školy Báňské - Technické univerzity Ostrava: Řada strojní*. 2001, 47, 1/část1, s. 21 - 26.
- [12] ISCAR. *Kompletní katalog nástrojů : Nástroje rotační*. 2008.

9. Seznam příloh

Příloha č.1: Výkres součástí do planetové převodovky

Poděkování

Děkuji spolumajiteli firmy J.P.Technology panu Ing. Josefu Příbylovi a dalším pracovníkům této společnosti za poskytnutí podkladů a za cenné rady při řešení daného experimentu.

Další poděkování bych chtěl věnovat vedoucímu bakalářské práce panu Doc. Ing. Vladimíru Vrbovi, CSc za odborné vedení a rady při její tvorbě.